

学校编码: 10384

学号: 18120051301640

分类号\_\_\_\_密级\_\_\_\_

UDC\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

垂直轴微风发电机的叶片设计与模拟分析

Simulation and Analysis of the Blade Shape  
of Savonius VAWT

范正萍

指导教师姓名: 王亚军 副教授

专 业 名 称: 凝聚态物理

论文提交日期: 2008 年 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2008 年 6 月

Simulation and Analysis of the Blade Shape  
of Savonius VAWT

A Dissertation Presented

By

Fan Zhengping

Supervisor: Associate Professor Wang Yajun

Submitted to

the Graduate School of Xiamen University

for the Degree of

MASTER OF SCIENCE

Department of Physics, Xiamen University,

People' s Republic of China

June, 2008

## 厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

2008 年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密 ( ), 在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密 ( )

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名: 日期: 年 月 日

导师签名: 日期: 年 月 日

## 目录

摘要.....	I
Abstract .....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 本课题研究背景.....	1
1.2 国内外研究技术现状.....	2
1.3 本课题研究内容.....	3
第二章 基本概念和基本原理.....	5
2.1 Savonius 型风力机.....	5
2.1.1 传统 Savonius 型风力机的基本结构及原理.....	5
2.1.2 Savonius 型风力机与主流风力机的比较.....	6
2.1.3 风力机的功率和转矩计算.....	8
2.2 空气动力学及流体力学基础.....	9
2.2.1 流体的性质和分类.....	9
2.2.2 湍流概述.....	9
2.2.3 低速不可压缩流体.....	11
2.2.4 能量方程.....	12
2.2.5 声速和马赫数.....	13
2.2.6 风洞基础知识.....	15
2.3 FLUENT 及使用简介.....	17
2.3.1 FLUENT 软件介绍.....	17
2.3.2 FLUENT 使用方法.....	18
2.3.3 FLUENT 的前处理.....	22
2.3.4 FLUENT 的后处理.....	25
第三章 叶片设计.....	27
3.1 参数变化对 Savinuous 型风力机性能的影响.....	27
3.1.1 螺旋型叶片形状.....	27
3.1.2 改变高径比 (aspect ratio).....	27
3.1.3 改变叶片交叠部分的大小.....	28
3.2 风力机叶片参数的确定.....	28
3.2.1 拟输出功率下对应的风力机性能参数.....	28

3.2.2 叶片外形基本参数 .....	28
<b>3.3 叶片建模 .....</b>	<b>29</b>
3.3.1 二维叶片建模 .....	30
3.3.2 三维叶片建模 .....	31
<b>第四章 流场模拟 .....</b>	<b>32</b>
4.1 二维流场模拟 .....	32
4.1.1 转轴直径为 60mm 的叶片的流场模拟 .....	32
4.1.2 转轴直径为 14mm 的叶片的流场模拟 .....	39
4.1.3 其他情况的模拟 .....	41
4.2 三维流场模拟 .....	41
<b>第五章 模拟结果分析 .....</b>	<b>43</b>
5.1 二维模拟结果分析 .....	43
5.1.1 转轴直径为 60mm 的叶片模型的流场模拟分析 .....	43
5.1.2 转轴直径为 14mm 的叶片模型的流场模拟分析 .....	46
5.1.3 其他情况下的模拟结果比较 .....	52
5.2 三维模拟结果分析 .....	54
<b>第六章 结论及展望 .....</b>	<b>56</b>
6.1 本文的主要工作 .....	56
6.2 本文的主要创新点 .....	57
6.3 研究展望 .....	57
<b>参考文献 .....</b>	<b>59</b>
<b>论文发表情况 .....</b>	<b>63</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>64</b>

## TABLE OF CONTENTS

<b>Abstract in Chinese .....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract in English.....</b>	<b>III</b>
<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 The Backgroud of Wind Power Research.....	1
1.2 The Research in the World.....	2
1.3 Main Content of this Paper.....	3
<b>Chapter2 Basic Concept and Theory.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 The Introduction of the Savonius Wind Turbines.....</b>	<b>5</b>
2.1.1 The Basic Constructure and Theory of the Traditional Savonius Turbines.....	5
2.1.2 The Compare between the Savonius Turbines and the Main Conventional Turbines.....	6
2.1.3 The Calculation on the Output Power and Torque of the Wind Turbine.....	8
<b>2.2 The Basic Theory of the Fluid Dynamics and Aerodynamics.....</b>	<b>9</b>
2.2.1 The Characteristics and Classification of Fluid.....	9
2.2.2 The Conception of the Turbulance Flow.....	9
2.2.3 The Un-compressible and Low-velocity Fluid.....	11
2.2.4 The Energy Equation.....	12
2.2.5 The Sound Velociy and the Ma Number.....	13
2.2.6 The Basic Theory of the Wind tunnel.....	15
<b>2.3 Fluent and the Way to Use.....</b>	<b>17</b>
2.3.1 The Introduction of FLUENT .....	17
2.3.2 The Way to Use FLUENT .....	18
2.3.3 The Preprocess of FLUENT .....	22
2.3.4 The Postprocess of FLUENT.....	25
<b>Chapter3 The Design of the Blades.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 The Effect of the Parameters Change to the Savonius Turbines.....</b>	<b>27</b>
3.1.1 The Twisted blades .....	27
3.1.2 The Change of the Aspect Ratio.....	27
3.1.3 The Change of the Overlap Ratio.....	28

<b>3.2 The Design of the Parameters of the Baldes .....</b>	<b>28</b>
3.2.1 The Performance Parameters on the Output Power Designed.....	29
3.2.2 The Constructure Parameters of the Blade.....	29
<b>3.3 The Modeling of the Blades.....</b>	<b>29</b>
3.3.1 The 2-D Modeling of the Blades.....	30
3.3.2 The 3-D Modeling of the Blades.....	31
<b>Chapter 4 The Simulation.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1 The 2-D Simulation.....</b>	<b>32</b>
4.1.1 The Simulation of the 60mm-Shaft Blades .....	32
4.1.2 The Simulation of the 60mm-Shaft Blades .....	39
4.1.3 The Simulation in the other Situation.....	41
<b>4.2 The 2-D Simulation.....</b>	<b>41</b>
<b>Chapter5 The Analysis of the Simulaiton Results.....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 The Analysis of the 2-D Simulation Results.....</b>	<b>43</b>
5.1.1 The Analysis of the 60mm-Shaft Blades Simulation.....	43
5.1.2 The Analysis of the 14mm-Shaft Blades Simulation.....	47
5.1.3 The Analysis of the Simulation in the other Situation.....	52
<b>5.2 The Analysis of the 3-D Simulation Results.....</b>	<b>54</b>
<b>Chapter6 The Conclusions and the Future.....</b>	<b>56</b>
<b>6.1 Conclusions.....</b>	<b>56</b>
<b>6.2 New Items.....</b>	<b>57</b>
<b>6.3 Look Ahead.....</b>	<b>57</b>
<b>Reference.....</b>	<b>59</b>
<b>List of Papers.....</b>	<b>63</b>
<b>Acknowledgement.....</b>	<b>64</b>



## 摘 要

随着可再生能源使用的发展，风电已成为世界上最为主要的能源输出之一，其重要性也受到日益重视。叶片是风力机的一个重要的组成部分，它的形状对风力机吸收风能的效率起着至关重要的作用。本课题以厦门市人事局留学人员回国择优资助项目《垂直轴微风风力发电系统的设计》为背景，主要研究小型家用垂直轴风力发电机叶片的设计，优化及计算机模拟。主要研究成果如下：

### 1. 风力机叶片的设计

(1) 探讨叶片设计的通用方法。综合国内外多种叶片设计方法，整理现有叶片设计模型理论，得出一种简单有效的、非传统形状的风力机叶片的设计方案。利用机械设计软件 CATIA 对叶片的形状建模，在流体工程模拟软件 FLUENT 中对其进行模拟分析。

(2) 叶片精确的实体建模仿真。以输出电功率  $P=80\text{w}$  为目标，以传统的 Savonius 型风力机叶片为基础，通过曲面功能强大的 CATIA 作为曲面建模工具对风力机叶片的形状进行设计。对于复杂叶片，可以通过确定关键点的方法来定义叶片的边界曲线，为叶片进一步的动力学分析奠定基础。该建模方法可以为扭曲的螺旋形 Savonius 型风力机叶片和其他复杂实体精确建模提供参考。这个方法适用于各种特殊形状的风力机叶片的设计，使用范围广，能够提高叶片设计方法的通用性。

### 2. 叶片动力学特性分析

建立风洞模型，完全模拟接近真实风况下叶片周围的空气流动。并且运用流体工程模拟软件 FLUENT 采用有限元方法进行模拟分析，对优化前后的叶片进行二维及三维分析，得到叶片周围流体的速度矢量分布及叶片表面各处的压力及应力分布情况，验证了动力学性能较为出色的 Savonius 型叶片，为叶片的进一步设计提供参考。

关键词： 叶片设计；有限元方法；模拟

## Abstract

With the development of the recycle resource, wind power becomes one of the most important renewable resources in the world, especially when the environment is badly polluted and the conventional resource is drying up. More and more attention is being paid to the wind energy for its particular merits, which is recognized by the whole world by its cleanness and recycle characteristics.

Blade is one of the most important components of the wind turbine, the shape of which greatly affects the power coefficient of the wind turbines. The paper studied the design model, performance characteristics and dynamics analysis of the blades of the Savonius wind turbines. The main conclusions are as follows:

1. The design of the blades of the wind turbines

- (1) The discussion of the universal method of the blade design. Synthesizing with the multiple methods of blade design in the world, a simple and effective way to design non-traditional wind turbine blades basing on existing blade design theory has been achieved. The way is to use the mechanics design software CATIA to model the shape of the blade, which is simulated and analyzed in a fluid engineer simulation software FLUENT. The method can be applied in multiple special type of blade shape design and quite effective results can be achieved in most of times.

- (2) Precise model of the blade design. With the mechanics design software CATIA, basing on traditional Savonius blades, the blades' shape is designed and the target of the output power is 80w. The multiple shapes of the blades of the wind turbines can be achieved through the software CATIA, which is of great function in shape design, especially in surface design. To the complex blades, the boundary curve can be defined by the method of fixing the key points, which can provide important information to the further dynamics analysis of the blades. The modeling method is a good example to the blades of the twisted-bladed Savonius wind turbines and other complex entity modeling which needs precise design. The method is applicable for the design of multiple shape, and increase the applied area of the blade design

method.

2. The dynamics analysis of the blade. The wind tunnel was designed to simulate the air flow alongside the wind turbine which resembles the real wind situation to a large extent. The fluid engineer simulation software FLUENT was used to simulate the real wind situation, and the finite element analysis method was used to analyze. The velocity vectors, the pressure coefficient alongside the blade and the applied forces distribution situation alongside the blades were achieved through the 2-dimension simulation, 3-dimension simulation before and after the optimization. The blade with a better dynamics performance was recognized finally, which provides the information of great reference value to the further research to the blades of wind turbines of multiple types.

Key Words: Optimization; Simulation; Finite element analysis

## 第一章 绪论

### 1.1 本课题研究背景

面对日益严峻的能源形势——化石燃料日益枯竭、不可再生资源的持续无节制消耗、环境污染的加剧，节能环保已经成为当今世界最重要且永恒的主题。大力发展清洁能源（可再生能源）是人类社会文明进步的表现和环境保护的需要。风能等可再生能源的开发已经越发引起了世界各国的重视，风能发电在各种可再生能源利用技术中也比较成熟。风力发电有其自身独特的优越性，主要体现在以下四个方面：

1. 世界上风能储量丰富。尽管到达地球的太阳能仅有 2% 转化为风能，但其总量十分可观。全球可实际利用的风能约  $2 \times 10^7 \text{ MW}$ ，比地球上可开发利用的水能总量还要大十倍。而且我国幅员辽阔，海岸线长，风力资源丰富，居世界第三位，据有关专家测算，我国风力理论可开发总量为 32.26 亿 KW，实际可供开发量为 2.53 亿 KW，居世界首位<sup>[10]</sup>。

2. 风能是一种洁净的可再生能源。开发风电，不会产生辐射或环境污染，不会引起温室效应，不会存在核电放射性废料对人类的威胁，这是世界各国努力开发风电的主要原因之一。

3. 风电技术相当成熟。目前单机容量 500、600、700KW 的风电机组已达到批量商业化生产的水平，成为当前世界风力发电主力机型。更大型、性能更好的机组也开始开发出来，并投入试运行。本世纪，兆瓦级的风力发电机已占到主导地位。

4. 风力发电的经济性日益提高。和火电相比，不存在厂房、运输、除灰等问题；和水电相比，不存在筑坝、淹地、移民等问题。发电后除折旧费和维护费外，不消耗燃料，无三废处理问题。其成本接近火电，低于油电、核电，从综合效益看，具有较强的竞争力。

综合资源，环保，经济，技术四方面的因素，大规模发展风电是解决世界能源和电力短缺的最现实的战略决策。从 20 世纪 90 年代开始，世界能源电力市场发展最为迅速的是太阳能发电、风力发电等可再生能源<sup>[38]</sup>。

## 1.2 国内外研究技术现状

然而由于风力发电机的造价和运营成本很高，风力机的维护困难、储能模块的性能不够优越，风电的价格仍然居高不下，目前还无法以和常规电相同的价格用上风电。风电的价格也导致其进一步的发展受到限制。

基于以上原因，也导致了世界上越来越多的人开始研究开发小型风力发电系统用于家庭用电。在北美，欧洲，以及台湾都有很多的人在自制小型水平轴风力发电机用于家庭使用。这种风力机最大的缺点便是体积大，安装不便，一旦有暴风袭击，自制系统由于工艺上的限制，很容易发生倒倾现象。另外由于常住居民区不存在大的风场，而水平轴风力机启动风速较高，很难达到启动风速。为了保证风力机的叶轮始终处于最大受风面所在位置，还需加上迎风装置，这又增加了设计的难度。

在欧洲，有很多人开始重视垂直轴微发电机的开发和应用。垂直轴风力机主要有升力型即戴瑞斯型(Darrieus type)和阻力型即萨窝纽斯型(Savonius type)。戴瑞斯型的启动转矩小，启动性能差，需要靠其他动力启动，达到特定的转速才能正常运行。这就对自制风力机者增加了很大难度<sup>[2]</sup>。

Savonius 型风力机是低转速的，有如下优点：

1. 为简单机械，很容易制作；
2. 具有大启动转矩，不但容易运行，而且在任意风速下都易于启动；
3. 在强风作用下也能运行（而此时绝大多数的高速风力机已经停止运行）；
4. 可以把电机部分安装在建筑物或其他物体的表面；
5. 日常维护处理相当简单。

而 Savonius 型风力机的主要缺点是：

1. 慢转速：叶片几乎是以与风速同样的频率在运转，这就导致电能的生产十分困难，尤其是在把产生的电流直接传送到电网的时候。
2. 风能利用系数很低：实际上，风能利用系数与最好的水平轴风力机相比，只有其值的 50%。由于施加在叶片上的阻力不同，这就导致了这种风力机在动力学性能上的不良表现。

Savonius 型风力机的矛盾表现引起了很多人的兴趣。尽管 Savonius 垂直轴风

力机可以在较低的风速下启动发电,但是风力机在风速较低时还是无法产生足够电能的。考虑到我国的风能分布,年平均风速达到  $6\text{m/s}$  以上的地区主要集中在沿海及其岛屿,这些地区年有效风能功率密度在  $200\text{W/m}^2$  以上,一些地区甚至可以达到  $500\text{W/m}^2$  以上。特别是由于台湾海峡狭管效应的影响,东南沿海及其岛屿是我国风能最佳丰富区,风速 $\geq 3\text{m/s}$ (有效风速)全年出现累积小时数为  $7000\sim 8000\text{h}$ (全年为  $8760\text{h}$ ); 风速 $\geq 6\text{m/s}$  有  $4000\text{h}$  左右<sup>[10]</sup>。综合以上考虑,在沿海地区选择此类风力机,可达到办公及家庭使用的目的。

在欧洲有人研究双层型风力机,螺旋叶片型,还有人研究其在机械水泵扬水上的应用,并且得到了出色的成果。目前已有出色的水平轴风力机模拟软件,如 **BLADED** 等可进行叶片的气动性能的模拟分析<sup>[38]</sup>。但目前对于微型垂直轴风力机的性能探讨主要停留在试验测定上,仍然没有一种简洁方便的计算机方法来研究其动力学特性。

### 1.3 本课题研究内容

叶片是风力机吸收风能的重要元件。叶片的形状设计,叶片变形及叶片的动力学参数性质一直受到人们的关注。

本论文主要研究小型家用垂直轴微风型风力机叶片设计模型,性能计算和动力学分析。

#### 1. 风力机叶片的设计

(1) 探讨叶片的通用设计方法。整理现有风力机叶片设计模型中发现,水平轴风力机的叶片设计方法已相当成熟,如基于圆盘理论的简化设计模型,基于涡流理论的 **Schmitz** 模型、**Glauert** 模型和 **Wilson** 模型。垂直轴风力机的叶片设计目前没有理想的设计方法,特别是对于家用垂直轴微风型风力机,因其规格小易于制作,常采用实际制作测试。本文中采用机械设计软件 **CATIA** 设计叶片形状,因其有强大的曲面功能对于叶片形状的优化设计是极为有利的。

(2) 叶片实体建模仿真。基于上述设计基础,拟风力机输出电功率  $P=80\text{W}$ ,进行叶片设计。基于叶片设计数据,进行二维及三维变换。本文中以拟输出电功率  $80\text{W}$  为基础,相应数据为参照,建立叶片直径及高度一致的各个模型。以叶片各点的三维坐标为关键点,利用 **CATIA** 进行精确建模,并进一步进行扭曲处

理形成螺旋形叶片等其他优化步骤，为叶片的进一步动力学分析奠定基础<sup>[8][9]</sup>。

## 2. 风力机叶片气动性能模拟

国内目前对房间气流组织，两相流等的数值模拟很多，但针对流体机械的数值模拟很少，且主要集中在离心风力机，水泵等方面<sup>[21][24]</sup>，本文希望能对不受重视的 Savonius 型风机的数值模拟做出一些有价值的探索。叶轮，风洞等几何模型的建立是在 FLUENT 的前处理软件 GAMBIT6.3.16 中进行的。计算模拟部分采用的是 FLUENT6.2.16 计算商用软件。本文主要工作如下：

(1) 根据预定的风力机尺寸参数，在 FLUENT 前处理软件 GAMBIT 中完成风洞建模和网格划分工作。

(2) 确定计算域和边界条件，导入 FLUENT 软件。

(3) 通过选定合适的物理模型和各个控制参数，计算出风力机的周围流场。

(4) 通过改变风况的参数，如：风速、叶轮转速进行流场计算，绘制出模拟图。

(5) 改变风力机模型进行模拟计算，绘制出模拟图。

## 3. 叶片动力学性能分析

叶片是风力发电机中受力最复杂的部分，叶片动力学问题是风力机叶片设计的一个关键的问题。利用流体工程仿真软件 FLUENT 将建模软件中所建立的模型在设定的条件下进行分析。建立风洞，设立边界条件及与实际最为接近的风况，在多种叶片模型基础下进行模拟分析，得到叶片周围的流场分布，得到叶片周围流体的速度矢量分布图及叶片表面各处的压力及应力分布图。通过模拟得到的速度矢量图、压力系数分布图和切向应力分布图对各种叶片形状参数和不同的风况下，风力机叶片的表现进行讨论，对这些参数对风力机性能的影响进行探讨，从而预测出叶片形状对风力机性能的影响。通过上述步骤，验证了动力学性能较为出色的风力机叶片形状。

## 第二章 基本概念和基本原理

风力发电机是通过叶片旋转捕捉风能，转化为叶片的机械能，再通过发电机转化为电能，因此叶片的形状极为重要，它直接影响了风力机的风能利用效率。本章将阐述叶片的基本几何结构，流体力学和空气动力学基本概念和理论以及 FLUENT 软件的基本使用方法，为下文叶片设计分析奠定基础。

### 2.1 Savonius 型风力机

#### 2.1.1 传统 Savonius 型风力机的基本结构及原理

一般的 Savonius 阻力型风力机叶片形状，如图 1 所示，主要由两个半圆柱面型叶片构成，图 1 右边表示一般 Savonius 阻力型风力叶片的俯视图。

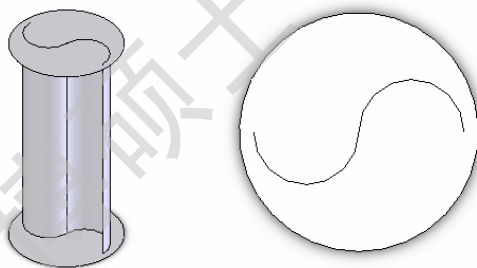


图 1. 传统 Savonius 风力机的外形

当风吹向叶轮时，叶片产生阻力，驱动风轮做逆时针方向旋转（俯视情况下），如图 1。凹下的叶片驱动风轮旋转，凸起的叶片阻碍风轮旋转，每个叶片产生的阻力  $F_d$  可以用下式计算<sup>[15]</sup>：

$$F_d = \frac{1}{2} \rho (v \mp u)^2 A_v C_d \quad (2.1)$$

式中， $\rho$  为空气密度， $v$  为风速， $u$  是叶片线速度， $A_v$  是叶片的最大投影面积， $C_d$  为叶片阻力系数，凹下的叶片  $C_d$  值取为 1.0，凸起的叶片的  $C_d$  值为 0.12~0.25。在计算  $F_d$  时，式中的“ $\pm$ ”号的选取：对风凹下的叶片（右面）取“ $-$ ”；对风凸起的叶片（左面）取“ $+$ ”。这种阻力型风力机，凹下的叶片产生的阻力大于凸起的叶片产生的阻力，风轮是按逆时针方向旋转。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库